



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
CAMPUS BAIXADA SANTISTA
INSTITUTO DO MAR

MARCELO BORDONAL SCORSATO

**POTENCIAL DE BIORREMEDIAÇÃO DAS MICROALGAS
EM ÁREAS CONTAMINADAS COM PETRÓLEO**

Santos / SP

2021

MARCELO BORDONAL SCORSATO

**POTENCIAL DE BIORREMEDIAÇÃO DAS MICROALGAS EM ÁREAS
CONTAMINADAS COM PETRÓLEO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado para obtenção do
grau de Bacharel em
Interdisciplinar em Ciência e
Tecnologia do Mar pela
Universidade Federal de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Jose Juan
Barrera Alba



SANTOS / SP

2021

Ficha catalográfica elaborada por sistema automatizado
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B729p Bordonal Scorsato, Marcelo.
POTENCIAL DE BIORREMEDIAÇÃO DAS MICROALGAS EM
ÁREAS CONTAMINADAS COM PETRÓLEO. / Marcelo Bordonal
Scorsato; Orientador Jose Juan Barrera Alba;
Coorientador . -- Santos, 2021.
29 p. ; 30cm

TCC (Graduação - Bacharelado Interdisciplinar em
Ciências e Tecnologia do Mar) -- Instituto do Mar,
Universidade Federal de São Paulo, 2021.

1. Biorremediação. 2. petróleo. 3. microalgas. 4.
biorrefinaria. I. Barrera Alba, Jose Juan, Orient.
II. Título.

CDD 551.46

Dedico este trabalho a minha
família, em especial a minha
mãe por me apoiar sempre e
acreditar nos meus sonhos e
aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Jose Juan Barrera Alba, meu orientador, pela ajuda e paciência e por estar ao meu lado durante todo o processo de elaboração do trabalho.

Aos meus amigos, em especial a Beatriz que tiveram muita paciência comigo durante toda esta caminhada, me ajudando de todas as formas acadêmicas e pessoais possíveis.

À minha família por todo o apoio prestado durante essa fase da minha vida, sem vocês jamais seria possível eu realizar este sonho que hoje compartilho com vocês com muita felicidade.

Ao meu avô que hoje não está mais aqui, porém a todo momento acreditou em mim e sempre estará presente no meu coração.

A Prof. Dr. Nancy Ramacciotti de O. Monteiro pelas orientações durante minha participação no projeto de monitoria.

Todos os professores e funcionários do Instituto do Mar que de alguma forma contribuíram para minha formação.

RESUMO

Considerando a importância crescente de fatores antrópicos é de suma importância estimar como o ambiente será afetado através desses fenômenos. Entre os impactos antrópicos nos ambientes costeiros que mais destaque estão recebendo nos últimos anos está o derramamento de petróleo. Acidentes dessa natureza podem ter impactos inestimáveis no meio ambiente. Diante de um cenário de derramamento de óleo várias técnicas de limpeza podem ser aplicadas, sendo uma delas a biorremediação tanto através do uso de microrganismos que degradem os contaminantes (bioadição) quanto de compostos que acelerem o processo natural de biodegradação no ambiente contaminado, estimulando o crescimento de organismos presentes nele (bioestimulação). A adição de um organismo no processo de biorremediação é vantajosa pois além de remediar o ambiente contaminado, pode gerar compostos de valor agregado através do processo denominado como biorrefinaria, que são indústrias que produzem biocombustíveis, energia e produtos químicos de base renovável pela mediação de microrganismos. O presente estudo visa realizar uma revisão crítica de protocolos e metodologias de biorremediação de áreas contaminadas com petróleo ou seus derivados com o uso de microalgas. No presente estudo é destacada a importância de avaliar diferentes técnicas que podem ser aplicadas para solucionar um mesmo problema, levando a diferentes resultados de eficiência de degradação. De forma geral os estudos avaliados apresentaram resultados satisfatórios, principalmente quando utilizadas as microalgas em consórcio com alguma bactéria ou componente químico. Não obstante, por ser uma área ainda em desenvolvimento, são necessários novos estudos que permitam o aperfeiçoamento das técnicas aplicadas para melhorar a eficiência e viabilidade dos processos.

PALAVRAS-CHAVE: Biorremediação, petróleo, microalgas, biorrefinaria.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compilado de dados do levantamento bibliográfico sobre o objetivo dos trabalhos.

Tabela 2: Compilado de dados sobre o tipo de contaminante, metodologia, microalga e tipo de consórcio do levantamento bibliográfico.

Tabela 3: Compilado de dados do levantamento bibliográfico sobre a eficiência dos trabalhos.

Tabela 4: Compilado de dados do levantamento bibliográfico sobre a conclusão dos trabalhos.

LISTA DE TABELAS

Figura 1: Fluxograma de biorrefinaria de microalga.

Figura 2: Fluxograma do resumo do levantamento bibliográfico.

Figura 3: Fluxograma de trabalhos que utilizaram consórcio microalga-bactéria e componentes químicos.

Figura 4: Fluxograma do trabalho de CHAILLAN et al., 2006.

Figura 5: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Aphanocapsa sp.*

Figura 6: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Chlorella kessleri*.

Figura 7: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Chlorella vulgaris*.

Figura 8: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Scenedesmus obliquus*.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.2 OBJETIVOS.....	12
2 METODOLOGIA	12
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4 CONCLUSÃO	24
REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos a poluição vem se agravando cada vez mais no ambiente aquático devido ao aumento populacional, aumento dos polos industriais, indústrias petroleiras, dentre outros, afetando diretamente no desenvolvimento e sobrevivência de organismos.

Atualmente, o derramamento de petróleo pode ser considerada uma das maiores catástrofes ambientais, principalmente quando ocorre em regiões costeiras. Alguns exemplos destes desastres são os derrames do Argo Merchant e Amoco Cadiz (Mar do Norte), Exxon Valdez (Alasca) e o derrame na Baía de Guanabara (PALADINO, 2000), além dos derramamentos que atingiram as regiões Nordeste e Sudeste do Brasil em 2019. Em acidentes de tal magnitude pode ser difícil avaliar os danos causados no ecossistema marinho, uma vez que o mesmo pode acontecer de várias formas e proporções (ERNESTO, 2010).

O petróleo é um produto que pode ser encontrado na natureza na forma fóssil, formado por matéria orgânica de microrganismos e vegetais sedimentados, e economicamente é um produto muito importante por ser uma fonte de energia e matéria-prima para diversos produtos (DE LEÃO CRAIG, 2012). Tem a densidade menor que a da água e possui alta toxicidade. O petróleo quando em contato com a água pode ser biodegradado, mas este processo é lento e ocorre em diversas etapas (ERNESTO, 2010). Segundo SPIRO; STIGLIANI (2009), o petróleo é formado por uma gama de compostos orgânicos, principalmente hidrocarbonetos.

Em função do aumento da demanda de produtos químicos nos últimos 10 anos (HASSANI et al., 2017), houve um incremento nos estudos baseados no impacto ambiental desse óleo nos oceanos e maneiras de reverter esses desastres (OMBANDZA, 2020; VELHO, 2015; CARNEIRO et al., 2014; RESENDE et al., 2015; DE LEÃO CRAIG, 2012).

Como o derramamento de petróleo é uma fatalidade que ocorre em todo o mundo, para reverter este cenário caótico, várias metodologias de limpeza podem ser aplicadas. O processo de biorremediação é normalmente priorizado nestes casos, visto que não causam danos adicionais à comunidade, porém é comum que este processo seja associado com outros métodos de limpeza (DE LEÃO CRAIG, 2012).

Segundo SWANNELL; LEE; MCDONAGH (1996), a técnica de biorremediação tem como função acelerar o processo natural de biodegradação do ambiente contaminado através de processos de bioestimulação e/ou bioadição.

O processo de bioadição, é a adição de organismos como bactérias ou microalgas, que são capazes de degradar os contaminantes por exemplo; já o processo de bioestimulação se dá através da adição de nutrientes e co-substratos que acelerem o processo natural de biodegradação no ambiente contaminado, estimulando o crescimento de organismos presentes nele (LEE; DE MORA, 1999). Por ser de baixo custo e muito versátil, acaba sendo mais vantajosa do que as técnicas clássicas de remediação, desse modo, essa técnica vem sendo cada vez mais estudada (NASCIMENTO et al., 2014).

As microalgas são os principais produtores que suportam as cadeias alimentares oceânicas (TATO & BEIRAS, 2019) podendo ser encontradas em diversos ambientes da Terra, vivendo isolada ou associada com outros organismos, como fungos e bactérias (WALTER, 2011). Elas têm um importante papel no ambiente e no mercado, uma vez que são produtores primários da cadeia alimentar aquática, são os principais organismos produtores de oxigênio e fixadores de carbono e sua biomassa possui diversas aplicações: dentre elas a produção de biocombustível, alimentação, cosméticos, medicamento, dentre outras (WALTER, 2012).

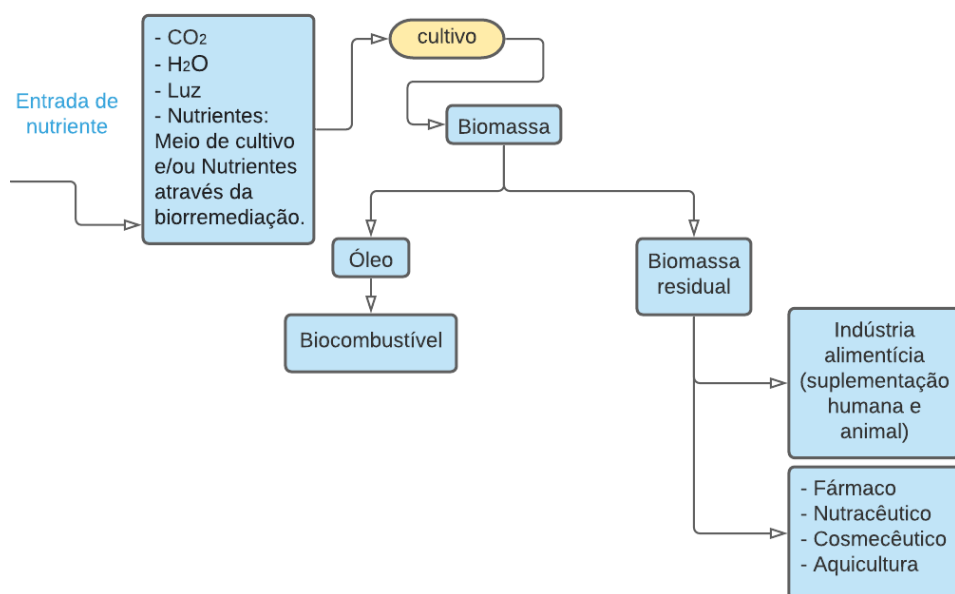
De uma forma geral, os tratamentos de áreas contaminadas costumam ser pouco eficazes, seja pelo alto custo dos métodos convencionais, pela ineficiência no tratamento de pequenas taxas de metais pesados, pela baixa concentração de nutrientes, ou até mesmo pela precariedade da fiscalização em âmbito nacional (BORGES, 2019).

Levando em consideração os fatores citados acima, acaba sendo vantajoso a aplicação da biomassa alternativa em processos de biorremediação, pois além de cumprirem seu objetivo principal, que é a remediação dos ambientes contaminados, também podem ser associados ao conceito de biorrefinaria, o que acaba promovendo seu potencial econômico através da produção secundária de produtos de valor agregado (DIAS, 2019).

O termo biorrefinaria é muito amplo e acaba tendo várias definições. Segundo BASTOS (2012) biorrefinarias são indústrias que produzem biocombustíveis, energia e produtos químicos de base renovável e muitas das inovações geradas na biorrefinaria tiveram origem de plataformas da biotecnologia industrial, oriunda de empresas de base tecnológicas start-ups.

As microalgas são organismos que possuem elevado potencial para sintetizar dentre vários outros elementos biocompostos que possuem um elevado valor agregado e que podem ser utilizados por diversas indústrias como a alimentação, biotecnologia, farmacêutica, cosmética, biofertilizantes, biocombustíveis, dentre outros (FERREIRA et al., 2013; JIN & MELIS, 2003), permitindo o desenvolvimento de processos biotecnológicos denominados como biorrefinaria de microalgas (Figura 1).

Figura 1: Fluxograma de biorrefinaria de microalga.



Fonte: Adaptado de: página do biodiesel a partir de microalgas Disponível em:

<<https://biodieseldemicroalgas.wordpress.com/2013/03/15/biorrefinaria-de-microalgas/>> Acesso em: set. 2020.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho proposto consiste em realizar uma revisão crítica de protocolos e metodologias de biorremediação de áreas contaminadas com petróleo ou seus derivados com o uso de microalgas, comparando eficiência, custos e potencial de integração com outros processos biotecnológicos.

2 METODOLOGIA

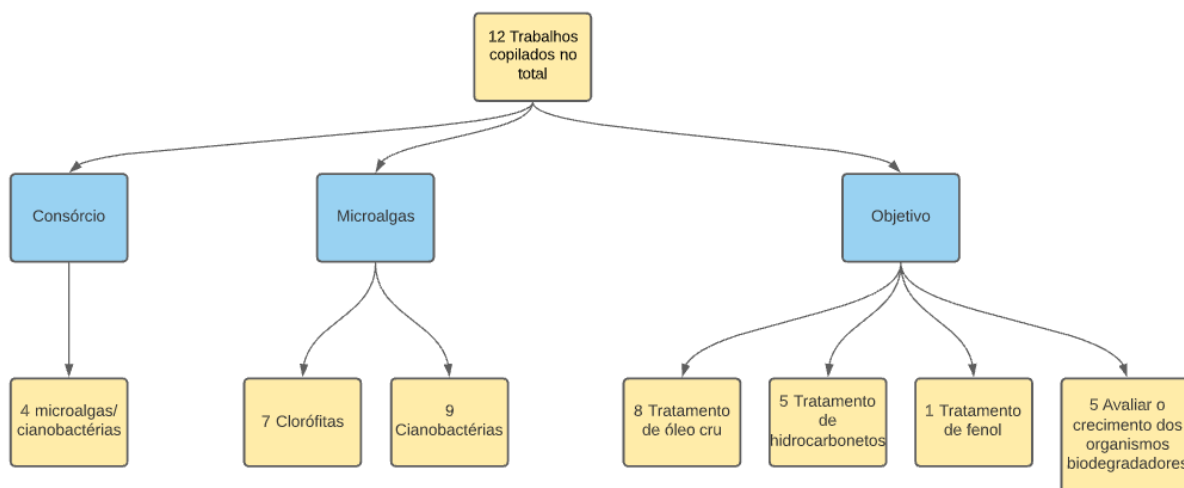
No estudo foi realizada uma revisão bibliográfica que aborda os métodos de biorremediação de áreas contaminadas com petróleo e seus derivados através de microalgas. Para a coleta de dados foi realizado o levantamento bibliográfico compilando os dados em planilhas com o objetivo de comparar as metodologias, eficiências, tipo de contaminante, de consórcio e qualquer outro fator que seja relevante para a pesquisa.

Foram priorizados trabalhos que tenham microalgas como principal biorremediador do óleo cru ou derivados nos estudos, podendo estar em consórcio com outros organismos ou produtos químicos que potencializem seu potencial de biorremediação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente estudo foram analisados diversos trabalhos que avaliam o potencial de biorremediação das microalgas através de contaminantes, podendo ser óleo cru ou derivado do mesmo, através de consórcio com outros organismos ou compostos (Tabelas 1 e 2). Dos trabalhos avaliados, 8 tiveram como objetivo principal o tratamento de óleo cru, 5 de hidrocarboneto e 1 de fenol. Em relação às microalgas empregadas nos tratamentos foram utilizadas 9 cianobactérias (*Oscillatoria salina*, *Plectonema terebrans*, *Phormidium animale*, *Nostoc punctiforme*, *Spirulina platensis*, *Microcoleus chthonoplastes*, *Phormidium corium*, *Oscillatoria agardhii* e *Anabaena sphaerica*.) e 7 clorófitas (*Scenedesmus obliquus*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella kessleri*, *Anabaena oryzae*, *Chlorella minutissima*, *Aphanocapsa sp.*, *Chlamydomonas reinhardtii*.) (Tabela 2). Consórcios entre bactérias e microalgas foram usadas em 4 estudos (Tabela 2). Por fim, 5 trabalhos avaliaram o crescimento dos organismos (Tabela 1). Todas estas comparações estão representadas na figura 2.

Figura 2: Fluxograma do resumo do levantamento bibliográfico.



Fonte: Elaboração própria. Adaptado de TANG et al., 2010; NICKLE et al., 2018; MADADI et al., 2016; EGBEROMOH & FAGADE, 2016; MORA-SALGUERO et al., 2018; RAGHUKUMAR et al., 2001; CHAILLAN et al., 2006; HAMOUDA et al. 2016; EL-SHEEKH et al., 2013; EL-SHEEKH & HAMOUDA, 2013; AJ HASAN et al., 1994; GAMILA et al., 2003.

Tabela 1: Compilado de dados do levantamento bibliográfico sobre o objetivo dos trabalhos.

AUTOR	OBJETIVO
(1) Tang et al. 2010.	Construir um consórcio de microalga-bactéria muito eficiente na degradação de óleo.
(2) Nickle et al. 2018.	Analisar o crescimento da <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella kessleri</i> e <i>Anabaena oryzae</i> submetidas à diferentes concentrações de nitrato de sódio e a biodegradação do petróleo bruto por cada espécie de algas.
(3) Madadi et al. 2016.	Avaliar o potencial de biorremediação da <i>Chlorella vulgaris</i> em águas residuais petroquímicas e determinar o potencial de remoção de substâncias orgânicas oriundas de águas residuais através dos surfactantes comerciais.
(4) Egberomoh & Fagade. 2016.	Avaliar o potencial dos consórcios microalga-bactéria em degradar hidrocarbonetos HPAs fracção de efluentes à base de petróleo.
(5) Mora-Salguero et al. 2018.	Avaliar a capacidade de degradação do fenol através de consórcio de microalga-bactéria.
(6) Raghukumar et al. 2001.	Analisar diversas culturas de cianobactérias axénicas para degradar o petróleo bruto em vários meios para possível aplicação no combate a degradação do petróleo bruto indonésio.
(7) Chaillan et al. 2006.	Analisar o potencial de biodegradação in situ do hidrocarboneto através de um tapete tropical de cianobactérias; A capacidade de degradação do tapete em condições de laboratório sobre uma amostra de petróleo; A capacidade da estirpe cianobactéria de assimilar os hidrocarbonetos em condições axénicas.
(8) Hamouda et al. 2016.	Avaliar o potencial de biodegradação do petróleo bruto através do consórcio de <i>Anabaena oryzae</i> e <i>Chlorella kessleri</i> .
(9) El-Sheekh et al. 2013.	Avaliar o potencial das microalgas <i>Scenedesmus obliquus</i> e <i>Chlorella vulgaris</i> em biodegradar o óleo cru, a capacidade de biodegradação de hidrocarbonetos através das condições de laboratório e a capacidade de <i>S. obliquus</i> e <i>C. vulgaris</i> em crescer através de condições heterotróficas na presença de petróleo bruto.
(10) El-Sheekh & Hamouda. 2013.	Avaliar o potencial de crescimento das cianobactérias <i>Spirulina platensis</i> e <i>Nostoc punctiforme</i> em condições heterotróficas e utilizando apenas o petróleo bruto como única fonte de carbono e a capacidade de biodegradação do petróleo perante as condições laboratoriais.
(11) AJ Hasan et al. 1994.	Avaliar se os tapetes de cianobactérias azul-verde têm sua mixotrofia envolvida durante a utilização do hidrocarboneto, assim contribuindo para a auto-limpeza da costa do Golfo.
(12) Gamila et al. 2003.	Avaliar o papel das estripes isoladas de cianobactérias hetero fotoautotrófico e do não heterosístico na biodegradação do petróleo bruto.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de TANG et al., 2010; NICKLE et al., 2018; MADADI et al., 2016; EGBEROMOH & FAGADE, 2016; MORA-SALGUERO et al., 2018; RAGHUKUMAR et al., 2001;

CHAILLAN et al., 2006; HAMOUDA et al. 2016; EL-SHEEKH et al., 2013; EL-SHEEKH & HAMOUDA, 2013; AJ HASAN et al., 1994; GAMILA et al., 2003.

Tabela2: Compilado de dados sobre o tipo de contaminante, metodologia, microalga e tipo de consórcio do levantamento bibliográfico.

AUTOR	TIPO DE CONTAMINANTE	METODOLOGIA	MICROALGA	CONSÓRCIO
(1) Tang et al. 2010.	Óleo cru (Oseberg)*	Consórcio alga- bactéria	<i>Scenedesmus obliquos</i>	<i>Sphingomona</i> , <i>Burkholderia cepacia</i> , <i>Pseudomonas</i> e <i>Pandora</i> <i>pnomenusa</i> .
(2) Nickle et al. 2018.	Óleo cru	Consórcio de nitrato de sódio e alga	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorella kessleri</i> e <i>Anabaena oryzae</i>	Nitrato de sódio
(3) Madadi et al. 2016.	Efluentes petroquímicos	Consórcio de surfactantes e alga	<i>Chlorella vulgaris</i>	Surfactante
(4) Egberomoh & Fagade. 2016.	Óleo cru (egbaoma)*	Consórcio alga- bactéria	<i>Chlorella minutissima</i> e <i>Aphanocapsa</i> <i>sp.</i>	<i>Citrobacter</i> <i>sp.</i> , <i>Pseudomonas</i> <i>aeruginosa</i> e <i>Bacillus subtilis</i> .
(5) Mora- Salguero et al. 2018.	Fenol	Consórcio microalga- bactéria	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i> , <i>Microbacterium paraoxydans</i> e <i>Paenibacillus lactis</i>
(6) Raghukumar et al. 2001.	Óleo cru (Bombay High)*	Cultura de cianobactérias	<i>Oscillatoria salina</i> , <i>Plectonema terebrans</i> e <i>Aphanocapsa</i> <i>sp</i>	-
(7) Chaillan et al. 2006.	Óleo cru	Tapetes cianobacterianos	<i>Phormidium animale</i>	-
(8) Hamouda et al. 2016.	Óleo cru	Consórcio de microalgas/ciano- bactérias	<i>Chlorella kessleri</i> e <i>Anabaena oryzae</i>	-

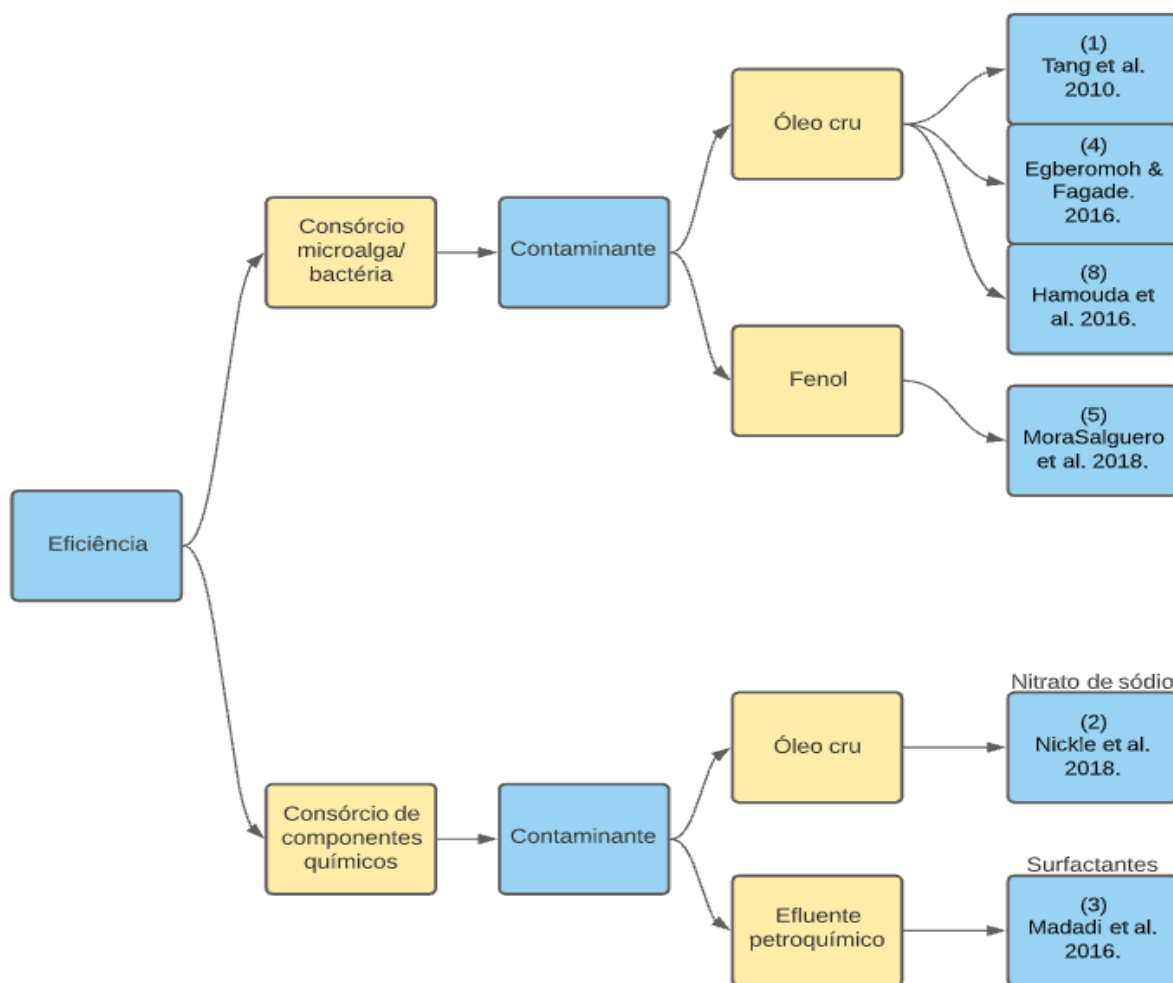
(9) El-Sheekh et al. 2013.	Óleo cru	Culturas de algas verdes em diferentes concentrações de petróleo bruto.	<i>Scenedesmus obliquus</i> e <i>Chlorella vulgaris</i>	-
(10) El-Sheekh & Hamouda. 2013.	Óleo cru	Incubação das algas em diferentes concentrações de petróleo bruto.	<i>Nostoc punctiforme</i> e <i>Spirulina platensis</i>	-
(11) AJ Hasan et al. 1994.	Óleo cru	Tapete microbiano	<i>Microcoleus chthonoplastes</i> e <i>Phormidium corium</i>	-
(12) Gamila et al. 2003.	hidrocarboneto	Cultura de cianobactérias	<i>Oscillatoria agardhii</i> e <i>Anabaena sphaerica</i>	-

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de TANG et al., 2010; NICKLE et al., 2018; MADADI et al., 2016; EGBEROMOH & FAGADE, 2016; MORA-SALGUERO et al., 2018; RAGHUKUMAR et al., 2001; CHAILLAN et al., 2006; HAMOUDA et al. 2016; EL-SHEEKH et al., 2013; EL-SHEEKH & HAMOUDA, 2013; AJ HASAN et al., 1994; GAMILA et al., 2003.

*Origem do óleo

Todos os estudos (1, 4, 5, e 8) que utilizaram o consórcio microalga-bactéria (Tabela 2) foram eficientes ou muito eficientes na degradação do contaminante tratado (Tabela 3). Nos dois estudos (2 e 3) que utilizaram componentes químicos como consórcio (tabela 2) não foi possível observar alguma correlação entre eles, uma vez que NICKLE et al. (2018) tinha contaminante o óleo cru, consórcio com nitrato de sódio (Tabela 2) e obteve uma boa eficiência de modo geral, exceto com a clorófito *Anabaena oryzae* (Tabela 3). Já MADADI et al. (2016) tinha como contaminante efluentes petroquímicos e consórcio com surfactantes (Tabela 2) e obteve uma excelente degradação de azoto e fosfato e uma boa degradação do hidrocarboneto (Tabela 3). Todas estas comparações estão compiladas no fluxograma da figura 3.

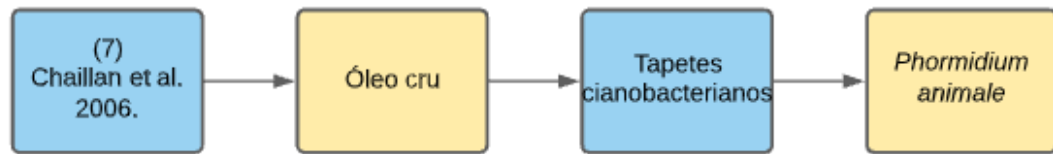
Figura 3: Fluxograma de trabalhos que utilizaram consórcio microalga-bactéria e componentes químicos.



Fonte: Elaboração própria. Adaptado de TANG et al., 2010; EGBEROMOH & FAGADE, 2016; HAMOUDA et al. 2016; MORA-SALGUERO et al., 2018; NICKLE et al., 2018; MADADI et al., 2016.

De uma forma geral, os trabalhos se mostraram eficientes perante seus objetivos (Tabela 3). Porém, segundo CHAILLAN et al. (2006), apesar do tapete natural ter sido muito eficiente na degradação do óleo cru, a cianobactéria *Phormidium animale*, que é a mais abundante no tapete, quando submetida a condições de crescimento axénicas não apresentou qualquer tipo de degradação do composto contaminante (Tabela 3 e 4). Este resultado mostrou a ineficiência de degradação deste organismo, sugerindo que possivelmente os outros microrganismos do tapete sejam responsáveis pela degradação do óleo (Tabela 4).

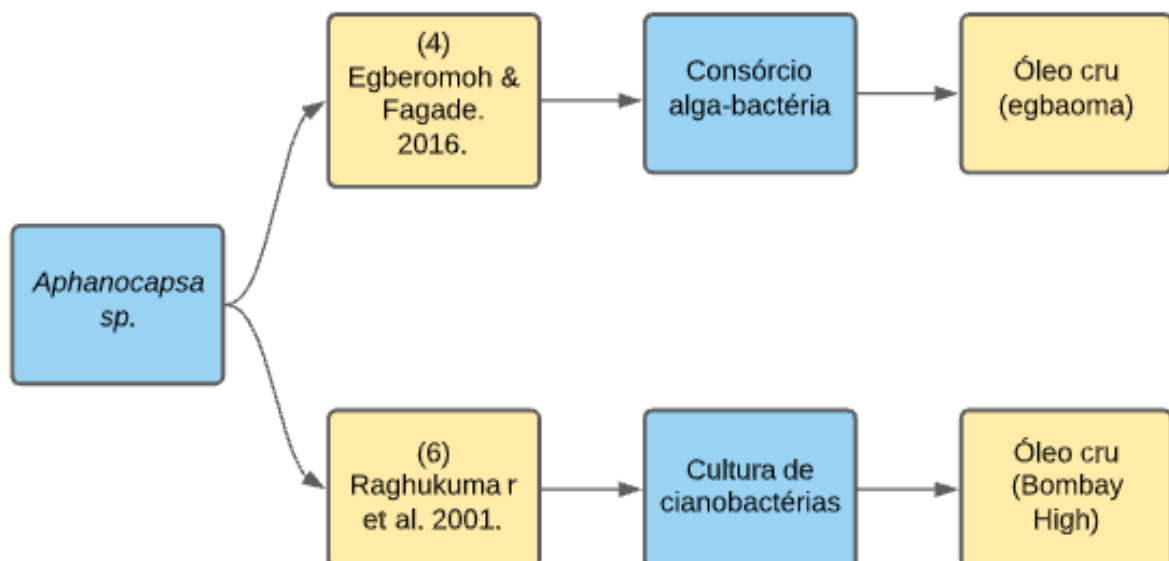
Figura 4: Fluxograma do trabalho de CHAILLAN et al., 2006.



Fonte: Elaboração própria. Adaptado de CHAILLAN et al., 2006.

Dentre as cianobactérias utilizadas nos estudos de EGBEROMOH & FAGADE (2016) e RAGHUKUMAR et al. (2001), a *Aphanocapsa* sp. foi usada para a degradação do óleo cru. Não obstante, EGBEROMOH & FAGADE (2016) usaram um consórcio alga-bactéria, enquanto que RAGHUKUMAR et al. (2001) utilizaram uma cultura de cianobactérias (Tabela 2). A diferença no método pode interferir diretamente nos resultados dos estudos, pois no trabalho de EGBEROMOH & FAGADE (2016) a *Aphanocapsa* sp. é o único organismo que não faz parte do consórcio que melhor se desenvolveu no experimento. Já no trabalho de RAGHUKUMAR et al. (2001), *Aphanocapsa* sp. foi capaz de degradar o poluente, pois a cultura mista por exemplo foi capaz de degradar cerca de 40% do óleo cru (Tabela 3). Todas estas comparações estão copiladas no fluxograma da figura 5.

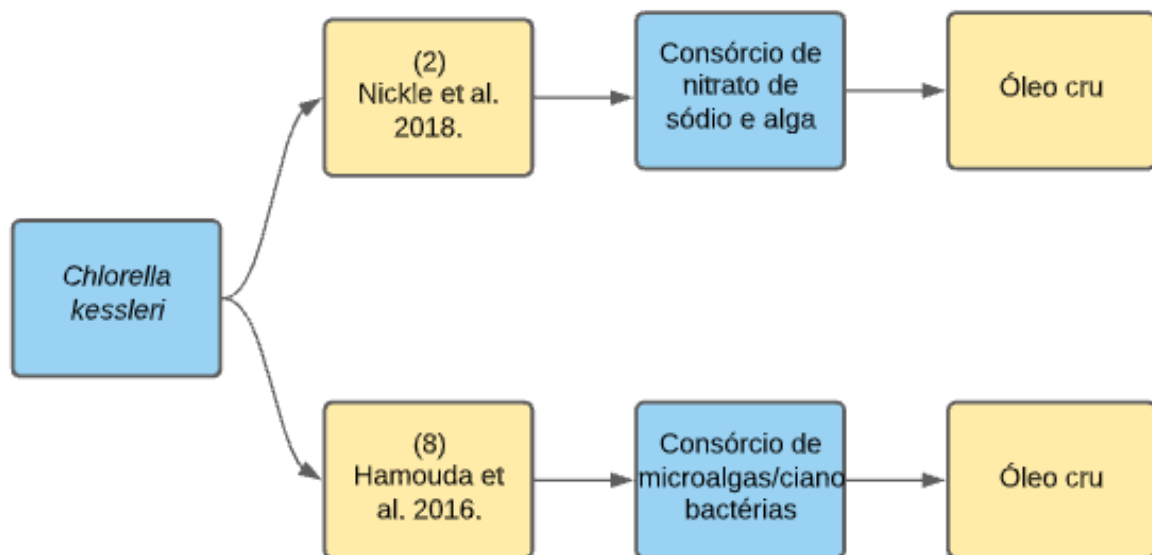
Figura 5: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Aphanocapsa* sp.



Fonte: Elaboração própria. Adaptado de EGBEROMOH & FAGADE, 2016 e RAGHUKUMAR et al., 2001.

Chlorella kessleri foi utilizada por (NICKLE et al. (2018) e HAMOUDA et al. (2016) em seus estudos para degradar o óleo cru. Entretanto, NICKLE et al. (2018) utilizaram um consórcio de nitrato de sódio e alga, obtendo resultados satisfatórios, sendo eficiente na degradação do óleo cru e crescimento (Tabela 2 e 3). Já HAMOUDA et al. (2016) usaram um consórcio de *C. kessleri* e *Anabaena oryzae*, obtendo também bons resultados tanto de crescimento, quanto de degradação do óleo cru (Tabela 2 e 3). Estas informações estão esquematizadas no fluxograma da figura 6. Não obstante, apesar de que são necessários mais estudos, é possível inferir que *C. kessleri* seja um ótimo biorremediador.

Figura 6: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Chlorella kessleri*.

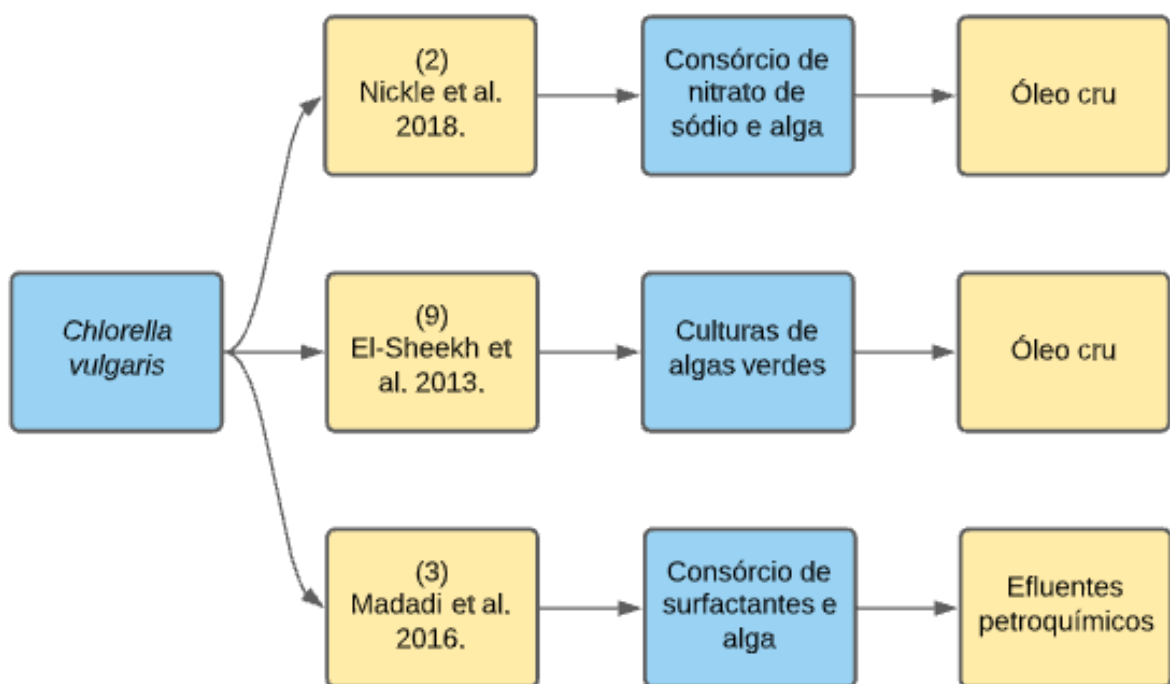


Fonte: Elaboração própria. Adaptado de NICKLE et al., 2018 e HAMOUDA et al. 2016.

Chlorella vulgaris também foi muito utilizada nos estudos avaliados. Os autores NICKLE et al. (2018) e EL-SHEEKH et al. (2013) utilizaram esta clorófito para a degradação do óleo cru. NICKLE et al. (2018), ao igual que o descrito para *C. kessleri*,

utilizou um consórcio de *C. vulgaris* com nitrato de sódio, obtendo ótimos resultados de degradação, porém não em relação ao crescimento (Tabela 2 e 3). Já EL-SHEEKH et al. (2013) empregaram um consórcio de algas verdes, dentre elas *C. vulgaris* e comprovaram que ambas as algas são capazes de degradar o óleo de uma forma eficiente quando incubadas em baixas concentrações de óleo. Dessa forma é possível indicar que *C. vulgaris* é um bom biorremediador do óleo cru em diferentes tipos de consórcio. Por outro lado, MADADI et al. (2016), que utilizaram *C. vulgaris* em seu estudo com o intuito de degradar efluentes petroquímicos através de um consórcio de surfactantes e alga, também obtiveram excelentes resultados na degradação do azoto e bons resultados de degradação do hidrocarboneto. Determinadas informações estão compiladas no fluxograma da figura 7.

Figura 7: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Chlorella vulgaris*.

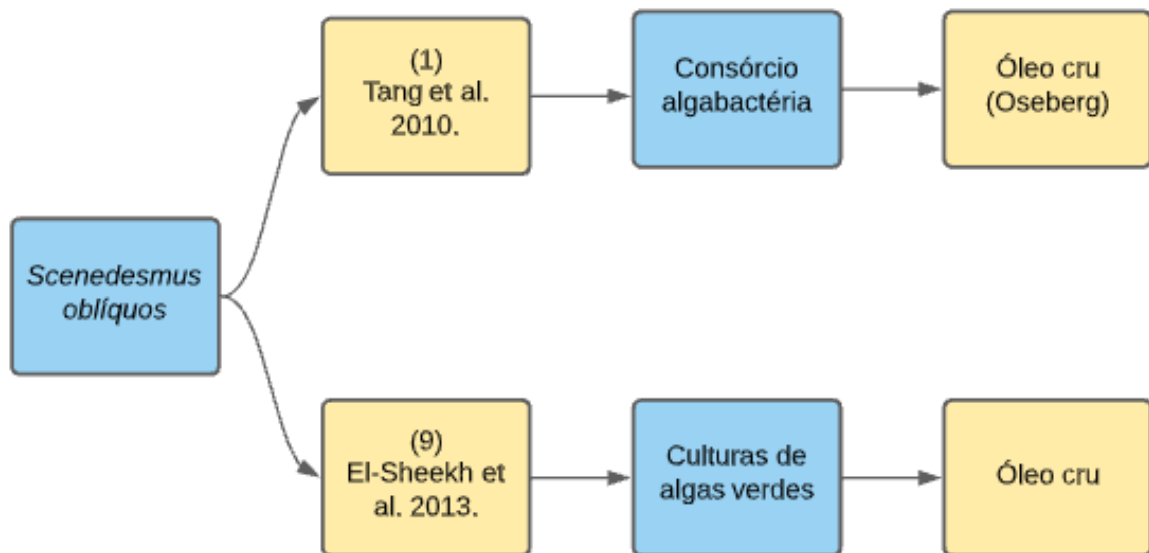


Fonte: Elaboração própria. Adaptado de NICKLE et al., 2018; MADADI et al., 2016; EL-SHEEKH et al., 2013.

Scenedesmus obliquus foi utilizada por TANG et al. (2010) com o objetivo de degradar o óleo cru e em consórcio com quatro bactérias, obtendo resultados positivos

na degradação de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos (Tabela 2 e 3). *S. oblíquos* também foi utilizada por EL-SHEEKH et al. (2013) em consórcio de algas verdes com o objetivo de degradar óleo cru e observar sua taxa de crescimento, sendo que também obtiveram resultados positivos em ambos os objetivos (Tabela 2 e 3). Dessa forma *S. oblíquos* se mostrou eficiente, tendo um bom potencial de remediação de áreas contaminadas com óleo.

Figura 8: Fluxograma dos trabalhos que utilizaram *Scenedesmus oblíquos*.



Fonte: Elaboração própria. Adaptado de TANG et al., 2010; EL-SHEEKH et al., 2013.

Tabela 3: Compilado de dados do levantamento bibliográfico sobre a eficiência dos trabalhos.

AUTOR	EFICIÊNCIA
(1) Tang et al. 2010.	O consórcio artificial demonstrou elevada eficiência na degradação de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos do petróleo cru.
(2) Nickle et al. 2018.	<i>C. kessleri</i> se mostrou eficiente na degradação do óleo cru e no seu crescimento. <i>C. Vulgaris</i> também se mostrou eficiente na degradação do óleo cru, porém ineficiente no crescimento. Já <i>A. oryzae</i> foi ineficiente de uma forma geral.
(3) Madadi et al. 2016.	A remoção de azoto e fosfato foi muito eficiente pois chegou aos 100%. Já a degradação de hidrocarbonetos chegou à 27%, sendo eficiente.
(4) Egberomoh & Fagade. 2016.	A degradação dos hidrocarbonetos foi eficiente em todos os consórcios, em especial o consórcio BCC (inoculantes de bactérias e <i>Chlorella minutissima</i>), onde a degradação foi muito eficiente chegando à 92,09%.
(5) Mora-Salguero et al. 2018.	O consórcio <i>icrobacterium paraoxydans-Chlamydomonas reinhardtii</i> se mostrou eficiente, uma vez que atingiu remoção de 49,89% de fenol.
(6) Raghukumar et al. 2001.	As cianobactérias se mostraram muito eficiente na degradação do óleo cru, uma vez que degradaram cerca de 45-55% em um período de 10 dias. Já a cultura mista das três espécies se mostrou eficientes degradando cerca de 40% do óleo cru.
(7) Chaillan et al. 2006.	O tapete natural se mostrou muito eficiente na degradação do óleo cru. Já a cultura axênica do <i>Phormidium animale</i> foi extremamente ineficiente na degradação dos hidrocarbonetos.
(8) Hamouda et al. 2016.	O consórcio foi capaz de crescer mixotroficamente e foi eficiente na degradação do petróleo bruto.
(9) El-Sheekh et al. 2013.	Ambas as algas são capazes de degradar o óleo de uma forma eficiente, uma vez que incubadas em baixas concentrações de óleo.
(10) El-Sheekh & Hamouda. 2013.	Ambas as microalgas foram capazes de crescer heterotroficamente e degradaram de forma muito eficiente os compostos alifáticos. Já os compostos aromáticos aumentaram em relação ao controle.
(11) AJ Hasan et al. 1994.	Ambas cianobactérias tiveram um crescimento fotoautófico muito eficiente na presença de petróleo bruto ou n-alcanos, podendo assim contribuir para a auto-limpeza da costa do Golfo.
(12) Gamila et al. 2003.	Ambas as cianobactérias foram ineficientes na degradação do óleo cru e seus compostos.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de TANG et al., 2010; NICKLE et al., 2018; MADADI et al., 2016; EGBEROMOH & FAGADE, 2016; MORA-SALGUERO et al., 2018; RAGHUKUMAR et al., 2001; CHAILLAN et al., 2006; HAMOUDA et al. 2016; EL-SHEEKH et al., 2013; EL-SHEEKH & HAMOUDA, 2013; AJ HASAN et al., 1994; GAMILA et al., 2003.

Tabela 4: Compilado de dados do levantamento bibliográfico sobre a conclusão dos trabalhos.

AUTOR	CONCLUSÃO
(1) Tang et al. 2010.	O consórcio GH2 foi capaz de degradar os hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos do petróleo cru. Possibilitando a construção de um consórcio artificial eficiente na degradação do petróleo bruto
(2) Nickle et al. 2018.	<i>C. kessleri</i> foi a que teve melhores resultados, obteve um bom crescimento e uma degradação eficiente do óleo. <i>C. Vulgaris</i> obteve uma boa taxa de degradação, porém baixo crescimento. Já <i>A. oryzae</i> foi ineficiente de uma forma geral.
(3) Madadi et al. 2016.	<i>C. vulgaris</i> chegou a até 100% de remoção de azoto e fosfato. Dessa forma a combinação da <i>C. vulgaris</i> com tensoativos é recomendada pois potencializa seu potencial de biorremediação de águas residuais petroquímicas.
(4) Egberomoh & Fagade. 2016.	O trabalho comprovou que o consórcio de microalga-bactéria tem capacidade de degradar o óleo, principalmente PAHs altamente moleculares.
(5) Mora-Salguero et al. 2018.	O inóculo 2:1 microalga-bactéria se mostrou a mais robusta, uma vez que ambas as microalgas apresentaram uma melhoria no seu crescimento. Além do mais os consórcios também mostraram potencial para degradação do fenol.
(6) Raghukumar et al. 2001.	Todas as três microalgas têm potencial de biorremediação do petróleo bruto e dos seus derivados, tendo então um forte potencial para serem utilizadas em remediação.
(7) Chaillan et al. 2006.	A cianobactéria <i>Phormidium animale</i> não demonstrou qualquer capacidade de degradação de hidrocarbonetos, provando que a atividade de degradação que ocorre no local é exclusivamente realizada pelos outros microrganismos presentes no consórcio microbiano do tapete.
(8) Hamouda et al. 2016.	O consórcio de microalga-cianobactéria mixotrófico foi capaz de degradar hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos. Sendo eficiente para a biorremediação de ambientes contaminados.
(9) El-Sheekh et al. 2013.	O trabalho confirmou que <i>S. obliquus</i> e <i>C. vulgaris</i> são capazes de crescer em condições heterotróficas. E as mesmas também são capazes de degradar n-alcanos e PAHs.
(10) El-Sheekh & Hamouda. 2013.	O trabalho provou que <i>N. punctiforme</i> e <i>S. platensis</i> são capazes de crescer em condições heterotróficas. E as mesmas também são capazes de degradar o conteúdo de compostos alifáticos do petróleo bruto.
(11) AJ Hasan et al. 1994.	O trabalho provou que os tapetes de cianobactérias contribuíram para a degradação do petróleo através do consumo de alcanos constituintes.
(12) Gamila et al. 2003.	<i>Oscillatoria agardhii</i> foi o organismo mais eficiente, pois melhor degradou os hidrocarbonetos. <i>Anabaena sphaerica</i> foi muito afetada pela concentração dos hidrocarbonetos, podendo associar este fato ao seu maior crescimento e menos potencial de degradação.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de TANG et al., 2010; NICKLE et al., 2018; MADADI et al., 2016; EGBEROMOH & FAGADE, 2016; MORA-SALGUERO et al., 2018; RAGHUKUMAR et al., 2001;

CHAILLAN et al., 2006; HAMOUDA et al. 2016; EL-SHEEKH et al., 2013; EL-SHEEKH & HAMOUDA, 2013; AJ HASAN et al., 1994; GAMILA et al., 2003.

Também foi possível observar que os estudos que utilizaram consórcio alga-bactéria (1 e 4) e trabalharam com o óleo cru como contaminante (Tabela 2) obtiveram uma eficiência elevada em relação à degradação do mesmo (Tabela 3). Tang et al. (2010) realizou um consórcio axênico de *S. obliquus* combinado com todas as quatro bactérias utilizadas no estudo, assim obtendo um consórcio com uma elevada taxa de biodegradação de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos do petróleo cru (Tabela 2 e 3). Já EGBEROMOH & FAGADE (2016) realizou alguns consórcios de forma que combinasse as algas e bactérias. Os consórcios BCC, BCCA e BCA foram os três mais eficientes, obtendo taxa de degradação do hidrocarboneto de até 92,09%, 67,76% e 47,19% respectivamente (Tabela 2 e 3). O estudo de MORA-SALGUERO et al. (2018) também utilizou consórcio alga-bactéria, porém utilizou o fenol como contaminante (Tabela 2) e observou que os consórcios que apresentaram uma menor concentração de fenol obtiveram um melhor desempenho (MORA-SALGUERO et al., 2018). O consórcio *icrobacterium paraoxydans-Chlamydomonas reinhardtii* se mostrou o mais eficaz, uma vez que atingiu remoção de 49,89% de fenol (Tabela 3).

4 CONCLUSÃO

No presente estudo foram compilados diversos trabalhos que utilizaram microalgas e/ou consórcios para remediação do óleo cru ou seus derivados, mostrando a importância de avaliar como diferentes técnicas podem ser aplicadas para solucionar um mesmo problema, levando a diferentes resultados de eficiência de degradação.

De forma geral, os estudos avaliados apresentaram resultados satisfatórios, principalmente quando foram usadas microalgas em consórcio com alguma bactéria ou componente químico. Não obstante, ainda são necessários novos estudos que permitam o aperfeiçoamento das técnicas aplicadas para melhorar a eficiência e viabilidade dos processos.

REFERÊNCIAS

- AL HASAN, R. H. et al. Utilization of hydrocarbons by cyanobacteria from microbial mats on oily coasts of the Gulf. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 41, n. 5, p. 615-619, 1994.
- BASTOS, V. D. Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/914>, 2012.
- BORGES, T. N.; COSTA, R. M.; GONTIJO, H. M. Caracterização do efluente de uma indústria de laticínios: proposta de tratamento. *Research, Society and Development*, v. 8, n. 1, p. e5081742-e5081742, 2019.
- CARNEIRO, V. DE C. TÍTULO: IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS DO PRÉ-SAL NA BACIA DE SANTOS-SP TÍTULO. Tese de Doutorado. CENTRO UNIVERSITÁRIO DAS FACULDADES METROPOLITANAS UNIDAS.
- CHAILLAN, F. et al. Role of cyanobacteria in the biodegradation of crude oil by a tropical cyanobacterial mat. *Chemosphere*, v. 62, n. 10, p. 1574-1582, 2006.
- DAS, Kishore; MUKHERJEE, Ashis K. Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India. *Bioresource technology*, v. 98, n. 7, p. 1339-1345, 2007.
- DE LEÃO CRAIG, A. P. et al. Técnicas de limpeza de vazamentos de petróleo em alto mar. *Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE*, v. 1, n. 1, p. 75-86, 2012.
- DIAS, G. et al. BIORREMEDIAÇÃO DE EFLUENTES POR MEIO DA APLICAÇÃO DE MICROALGAS-UMA REVISÃO. *Química Nova*, v. 42, n. 8, p.891-899, 2019.
- EGBEROMOH, GO et al. Consórcio microalgal-bacteriano na degradação de hidrocarbonetos poliaromáticos de efluente à base de petróleo. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, v. 7, n. 4, 2016.

EL-SHEEKH, M. M.; HAMOUDA, R. A. Biodegradation of crude oil by some cyanobacteria under heterotrophic conditions. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, n. 7-9, p. 1448-1454, 2014.

EL-SHEEKH, Mostafa M.; HAMOUDA, Ragaa A.; NIZAM, Adnan A. Biodegradation of crude oil by *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris* growing under heterotrophic conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 82, p. 67-72, 2013.

ERNESTO, M. F. S. Poluição por petróleo nos ambientes marinho e costeiro, 2010. Trabalho de Conclusão do Curso (TCC) do Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental da UNOPAR-Universidade Norte do Paraná, para a disciplina de Saúde e Meio Ambiente, Itajubá, Paraná, 2010.

FERREIRA, A. F. et al. A biorefinery from *Nannochloropsis* sp. microalga—Energy and CO₂ emission and economic analyses. *Bioresource technology*, v. 138, p. 235-244, 2013.

GAMILA, H. Ali; IBRAHIM, M. B. M.; EL-GHAFAR, HH ABD. The role of cyanobacterial isolated strains in the biodegradation of crude oil. **International journal of environmental studies**, v. 60, n. 5, p. 435-444, 2003.

HAMOUDA, Ragaa Abd El Fatah; SOROUR, Noha Mohamed; YEHEIA, Dalia Said. Biodegradation of crude oil by *Anabaena oryzae*, *Chlorella kessleri* and its consortium under mixotrophic conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 112, p. 128-134, 2016.

HASSANI, H; SILVA, E. S.; AL KAABI, A. M. The role of innovation and technology in sustaining the petroleum and petrochemical industry. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 119, p. 1-17, 2017.

JIN, E. Seon; FETH, Brian; MELIS, Anastasios. Um mutante da alga verde *Dunaliella salina* acumula zeaxantina constitutivamente em todas as condições de crescimento. *Biotecnologia e bioengenharia*, v. 81, n. 1, pág. 115-124, 2003.

LEE, K.; DE MORA, S. In situ bioremediation strategies for oiled shoreline environments. *Env. Technol.*, London, v. 20, n. 8, p. 783- 794, 1999.

MADADI, R. et al. Tratamento de efluentes petroquímicos pela alga verde *Chlorella vulgaris*. *International Journal of Environmental Research*, v.10, n.4, 2016.

MORA-SALGUERO, Daniela Alejandra et al. Evaluation of the phenol degradation capacity of microalgae-bacteria consortia from the bay of Cartagena, Colombia. *Tecnológicas*, v. 22, n. 44, p. 149-158, 2019.

NASCIMENTO, E. M. et al. Protocolo para biorremediação de águas contaminadas por petróleo e derivados. *E-xacta*, v. 7, n. 1, p. 55-63, 2014.

NICKLE, B. et al. Examining the Ideal Conditions for Crude Oil Bioremediation by Algae Species. 2018.

OMBANDZA, N. B. F. O impacto ambiental do transporte marítimo. 2020. Tese de Doutorado.

PALADINO, E. E.; Modelagem matemática e simulação numérica de trajetórias de derrames de petróleo no mar. 2000.

RAGHUKUMAR, C. et al. Degradation of crude oil by marine cyanobacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 57, n. 3, p. 433-436, 2001.

SALES, A.; SILVA, C.; RESENDE, F. Impacto ambiental da exploração dos recursos minerais marinhos. *Anuário de Produções Acadêmico-científicas dos discentes do Centro Universitário Araguaia*, v. 4, n. 1, p. 150-156, 2015.

SPIRO, T. G. e STIGLIANI, W. M. *Química Ambiental*. 2ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. Cap. 2 p. 26.

SWANNELL, R. P. J.; LEE, K.; MC DONAGH, M. Field evaluations of marine oil spill bioremediation. *Microbiological Reviews*, US, v. 60, n. 2, p.342-365, 1996.

TANG, X. et al. Construction of an artificial microalgal-bacterial consortium that efficiently degrades crude oil. *Journal of Hazardous Materials*, v. 181, n. 1-3, p. 1158-1162, 2010.

TATO, T.; Beiras R. The Use of the Marine Microalga *Tisochrysis lutea* (T-iso) in Standard Toxicity Tests; Comparative Sensitivity With Other Test Species. *Researchgate*, p. 1-2, 2019.

VELHO, Eduarda Leoneth Gaspar Mulende. O Impacto ambiental da extração petrolífera: “Estudo sobre a (re) evolução do Direito Ambiental”. 2015. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE PORTUGALENSE: Departamento de Direito.

WALTER, A. Estudo do processo biotecnológico para obtenção de ficocianina a partir da microalga *Spirulina Platensis* sob diferentes condições de cultivo. 133f. Dissertação. Pós-Graduação em Processos Biotecnológicos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.